

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ПИРОГЕННОЙ ДИНАМИКИ СЕВЕРОТАЕЖНЫХ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

И. Д. МАХАТКОВ

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: makhatkov@mail.ru

A remote sensor data was used to determine possible dates for the low-level fires in northern taiga pinewoods. For a model array, the fire areas were computed for the last 90 years. Some conclusions have been made about the natural fire-induced dynamics and its change under industrial development of region.

Введение

В таежной зоне Западной Сибири низовые пожары — явление естественное, в наибольшей степени свойственное сосновым лесам [1]. Их частота зависит от трех факторов — количества горючего материала, погодных условий и наличия источника огня. Присутствие человека в значительной степени меняет условия возникновения пожаров, в основном за счет увеличения источников огня.

В настоящее время основные усилия исследования лесных пожаров методами дистанционного зондирования сосредоточены в направлении их мониторинга, т. е. раннего обнаружения с применением автоматизированной обработки снимков, кратко- и среднесрочного прогноза возникновения пожаров и математического моделирования распространения лесного пожара [2]. Оценка пирогенной динамики лесов по спутниковым данным, как правило, сосредоточена на задаче определения площади сравнительно свежих гарей [3–5], хотя возможны определение общей пирогенной нарушенности лесов [6] и проведение ретроспективного анализа пирогенной динамики [7]. В то же время определение запасов лесного горючего материала как свойства восстановительной динамики леса может быть использовано для установления вероятности возникновения низинного пожара [8].

В северотаежной части Западно-Сибирской низменности [9] сосновые лишайниковые леса распространены исключительно на водно-ледниковых песчаных отложениях разного генезиса. Здесь основная часть лесного горючего материала низовых пожаров — кустистые лишайники, а восстановление этих лесов проходит без смены пород

в отличие от полидоминантных лесов, распространенных на сравнительно тяжелых отложениях [10]. Ретроспективу низовых пожаров этих лесов и попытались проанализировать, используя данные спутниковой съемки. В целом задачи исследования сводились к изучению возможности определения зависимости спектральных откликов сосновых лесов от их характеристик, в том числе даты последнего пожара, т. е. тематической калибровки снимка, и площади гарей разного возраста.

Кроме влияния пожаров леса массива в значительной степени расстроены строительством коммуникаций и концентрированными рубками. Коммуникации, в основном линейные, по отношению к участкам леса разного возраста размещаются случайным образом, их исключение из анализа не влияет на соотношение гарей разного возраста. Что касается вырубок, то их наличие существенно отражается на величине яркости [11] и в нашем случае добавило задачу исключения их влияния.

1. Материалы и методика

В качестве исходных данных использовано 12 описаний растительности сосновых лесов, заложенных осенью 2002 г. в одном из наиболее крупных сплошных массивов сосновых лесов в северотаежной подзоне Западной Сибири (63.06–62.77° с.ш. / 77.59–76.92° в.д.). Описания включали ленточный перечень древостоя и подроста, геоботаническое описание и отбор модельных деревьев на ход роста и определение давности (года) пожаров по подпалинам. Координаты пунктов определялись с помощью GPS. Пункты располагались так, чтобы по возможности охватить разнообразие лесов в восстановительных рядах послепожарной динамики. Три пункта были заложены на вырубках.

В качестве материалов дистанционного зондирования использован снимок Landsat ETM от 15 сентября 2000 г. Кроме собственных значений растровых слоев снимка использованы и их производные.

Для статистической обработки снимка применялись пакеты ERDAS, ArcGis и стандартные приложения Microsoft Office.

2. Результаты и обсуждение

В исследованном массиве по пожарным подпалинам зафиксированы самые старые пожары — 1877 г. и по максимальному возрасту поколения сосны — около 1785 г. Наиболее часто отмеченные пожары относятся к 1918, 1927, 1946 и 1967 гг.

Перечень древостоя и подроста в пунктах описаний позволил выявить основные типы структуры древостоя, находящейся в зависимости от давности нескольких последних пожаров и их интенсивности.

Интенсивный низовой пожар приводит к достаточно простому восстановительному ряду (рис. 1). На свежих гарях уцелевший древостой чрезвычайно разрежен — около 100 шт./га и представлен соснами от 20 до 40 см в диаметре, а запасы сухостоя составляют до 60 м³. Подрост сосны появляется на таких гарях сравнительно медленно — в течение первых трех-пяти лет, что связано, вероятно, с недостатком семян, но через 10 лет после пожара численность подроста сосны может достигать 25 тыс. шт./га. Через 30–40 лет на месте пожара формируется молодой сосновый лес со средним диаметром 4...8 см и численностью до 3000 шт./га. В сложении древостоя принимают участие и редкие деревья старших поколений, оставшиеся после пожара. Численность подроста

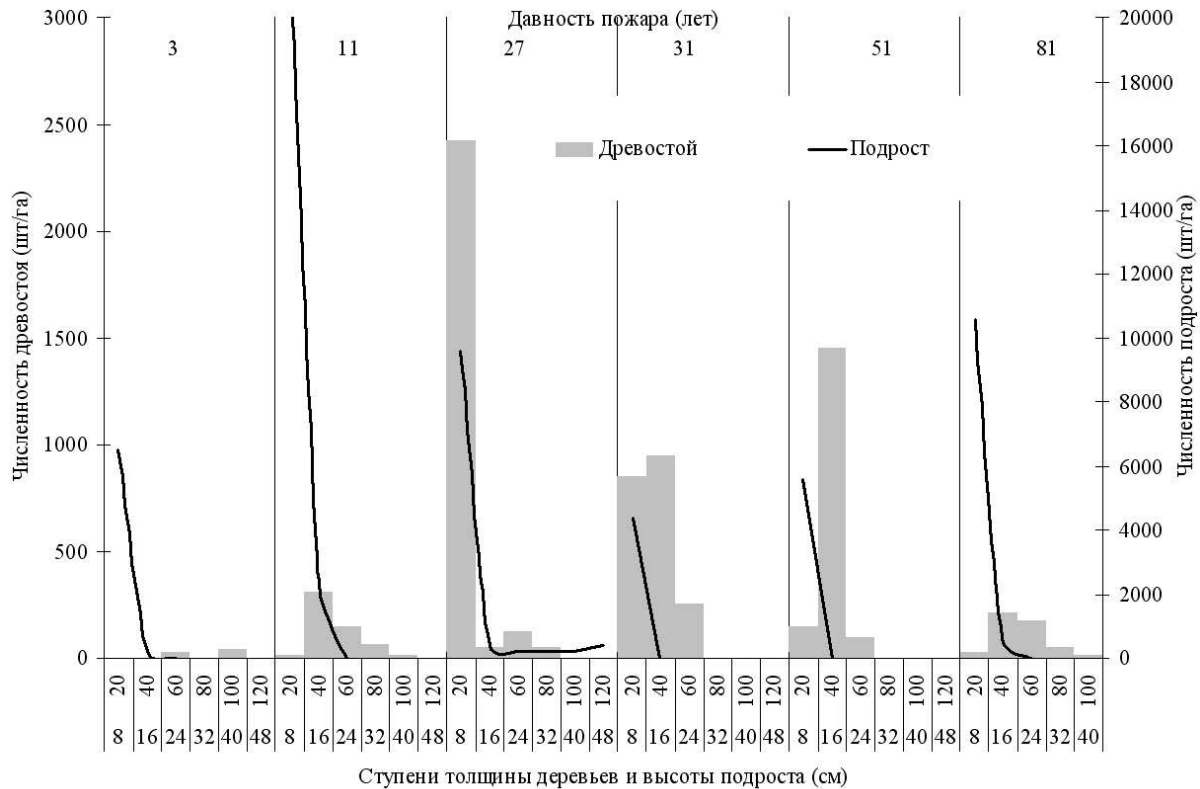


Рис. 1. Структура популяций сосны в послепожарном восстановительном ряду сосновых лесов (по пересчетам 6 пунктов)

начинает снижаться, так как прорастанию семян сосны препятствует восстанавливающийся мохово-лишайниковый ярус. На протяжении последующих 20–30 лет происходит постепенное изреживание древостоя до 2...1.5 тыс. шт./га при среднем диаметре 12...16 см, а в следующие 30 лет численность древостоя снижается до 500 шт./га при среднем диаметре около 20 см. В результате формируется одновозрастный древостой.

Для обследованной территории больше характерна ситуация, когда при низкой интенсивности пожаров повреждения деревьев оказываются незначительными и не приводят к усыханию большей части древостоя. В то же время после пожара наблюдается обильное возобновление сосны, впоследствии формирующее отдельное поколение древостоя. Повторение таких пожаров приводит к формированию ступенчато-разновозрастного древостоя.

Напочвенный покров лесов обследованного массива достаточно беден (см. таблицу). Кустарничковый ярус восстанавливается почти сразу после пожара. В мохово-лишайниковом ярусе доминируют пионерные виды мхов и лишайников. Кустистые кладонии начинают доминировать после 30 лет, к 50–60 годам начинают вытеснять пионерные виды, а к 80–100 годам мохово-лишайниковый ярус полностью восстанавливается.

Спектральные отклики сосновых лесов района значительно отличаются от откликов наиболее распространенных типов растительности (рис. 2). В каждом из диапазонов наблюдаются различия спектральных откликов, но наиболее значительны они в ближнем инфракрасном диапазоне (4). Значительны различия и в значениях теплового канала (6L, 6H), судя по которым сосновые леса — самый теплый ландшафт территории. Хотя крайние значения откликов всех типов растительности района в каждой из зон

Проективное покрытие видов напочвенного покрова сосновых лесов
(за исключением вырубок), %

| Вид покрова | Давность последнего пожара, лет | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 3 | 3 | 11 | 27 | 31 | 31 | 38 | 51 | 81 |
| | Номер канала | | | | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| <i>Vaccinium vitis-idaea</i> | 20 | 10 | 10 | 1 | 30 | 10 | 10 | 20 | 20 |
| <i>Vaccinium myrtillus</i> | | | | | | + | | | |
| <i>Calamagrostis epigeos</i> | | + | | | | | | | |
| <i>Chamerion angustifolium</i> | | + | | | | | | | |
| <i>Carex globularis</i> | + | + | | | | | | | |
| <i>Empetrum nigrum</i> | | | | 1 | + | | + | 1 | 1 |
| <i>Ledum palustre</i> | | | | 1 | | 1 | | | |
| <i>Pohlia nutans</i> | 80 | | | | + | | | | |
| Накипные лишайники | 10 | 1 | 1 | | | 1 | | | |
| <i>Politrichum strictum</i> | 10 | 90 | 1 | 1 | | 1 | | | |
| <i>Cladonia</i> sp. | 1 | | 90 | 50 | 50 | 50 | 30 | 20 | |
| <i>Cladina stellaris</i> | 1 | | 1 | 40 | 30 | 30 | 50 | 70 | 80 |
| <i>Cladina rangiferina</i> | | | + | 10 | 1 | 1 | 1 | | 1 |
| <i>Cladina mitis</i> | | | | 1 | 10 | 10 | 1 | 1 | |
| <i>Politrichum commune</i> | | + | | | | | | | |

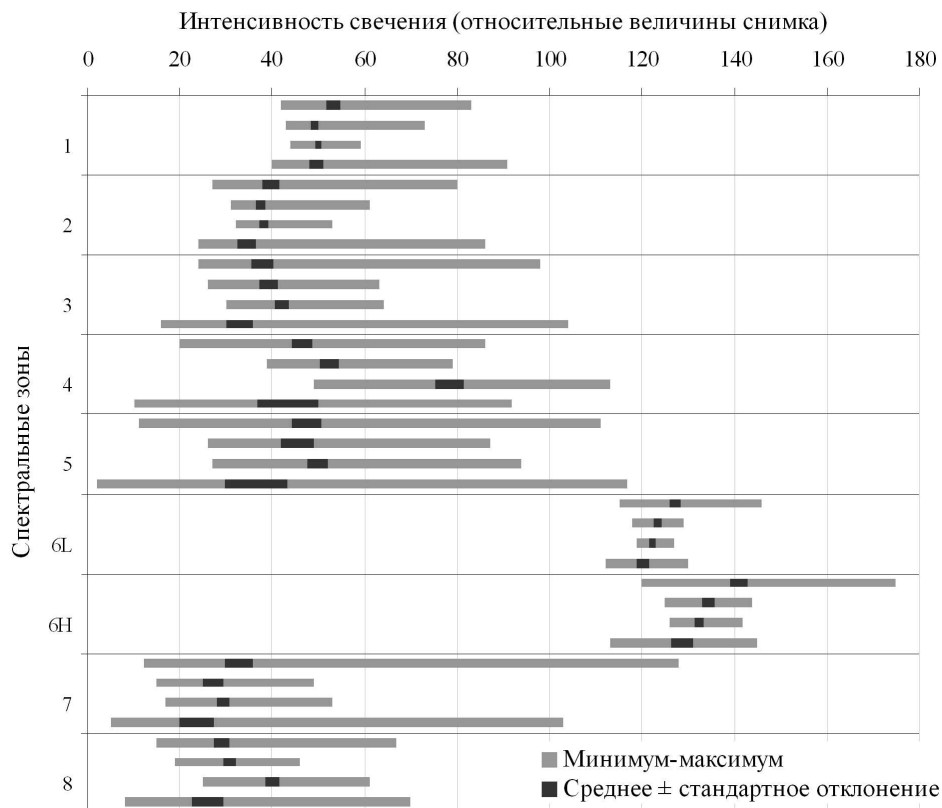


Рис. 2. Спектральные отклики основных типов растительности района исследований (в каждой из зон сверху вниз даны значения для сосновых лесов, полидоминантных лесов, осоково-сфагновых болот и комплексных плоскобугристых и грядово-мочажинных болот)

перекрываются, для выделения сосновых лесов оказалось достаточно простой классификации в ArcGis в несколько этапов (в каждой из зон) и совмещения результатов классификации. При этом удалось выделить исключительно сухоходольные лишайниковые сосновые леса и исключить из дальнейшей работы полугидроморфные сообщества, речные долины и сильно нарушенные площади — дороги, технологические площадки, территорию поселков и т. д.

Даты последнего пожара, определенные для пунктов описаний, проявили разную степень сопряженности со значениями спектральных откликов и их производных. Из значений спектральных зон наибольшую обратную связь с датой последнего пожара проявили 4 — ближний инфракрасный канал ($R = -0.91$) и 8 — монохромный ($R = -0.87$) и положительную 7 — средний (2.09...2.35 нм) инфракрасный канал ($R = 0.69$). Тесная связь даты последнего пожара со значениями монохромного изображения, представляющего сумму отклика во всем видимом диапазоне, объясняется тем, что свежие пожарища практически лишены напочвенного покрова и выглядят темными, а по мере его восстановления светлеют. Связь с ближним и средним инфракрасными каналами обусловлена, скорее всего, интенсивностью поглощения фотосинтетически активной радиации.

Проективное покрытие видов напочвенного покрова и их групп не проявляет тесной связи с годом последнего пожара и значениями спектральных откликов, за исключением суммарного проективного покрытия кустистых кладоний, проективное покрытие которых в восстановительном ряду сосновых лесов монотонно возрастает после пожара. Пионерные виды напочвенного покрова доминируют либо только на самых ранних этапах восстановления, либо ограниченное время, а доминирование кустарников вообще слабо связано с возрастом пожара. Проективное покрытие кустистых кладоний проявляет высокую связь с возрастом пожара ($R = -0.95$), довольно высокую связь с 7 — средним инфракрасным каналом ($R = -0.70$) и 6 — тепловым каналом ($R = 0.71$). Наиболее тесно связанный с датой последнего пожара ближний инфракрасный канал отличался еще и тем, что в нем существенно маскировались площади вырубок, а отклик самых свежих вырубок был близок к откликам старовозрастных лесов, что связано, возможно, с относительной сохранностью напочвенного покрова вырубок при почти полном отсутствии древесного яруса.

Связь даты пожара с активностью фотосинтеза подтверждается и ее довольно высокой связью с вегетационным индексом (NDVI). В нашем случае индекс для исследуемого массива леса колебался от 0.37 до -0.31 , а коэффициент корреляции составил -0.64 . В отличие от значений в инфракрасных каналах, NDVI оказался в большей степени связан с состоянием древостоя и его величиной, для свежих пожаров и вырубок они оказались близки, т. е. при калибровке пожаров в свежие пожары попадали и площади всех вырубок.

Из индексов линейных комбинаций для снимков Landsat ETM наибольшую связь с датой последнего пожара проявили индекс 1, интерпретируемый как “яркость” ($R = -0.71$), индекс 4 ($R = -0.85$) и индекс 6 ($R = 0.74$). С индексами 2 (“зеленостью”) и 3 (“влажностью”) дата последнего пожара не проявляла связь. На изображениях индексов 6 и особенно 1 хорошо выделяются вырубки и особенности рельефа, а границы лесных пожаров неясны и размыты. На изображении индекса 4, напротив, четко выделялись границы пожаров, а вырубки практически полностью маскировались, кроме самых свежих, значения индексов которых соответствовали лесам с несколько более давними пожарами, чем на массивах, прилегающих к вырубкам.

Множественная регрессия дала очень хорошую величину функциональной связи откликов с датой последнего пожара как при анализе значений всех каналов ($R^2 = 0.99$), так и при использовании каналов видимой и инфракрасной (каналы 1 — 5, 7) частей спектра ($R^2 = 0.99$). Хорошие результаты дал и метод главных компонент, которые рассчитывались для всех каналов. Наиболее значимой оказалась связь с четвертым компонентом ($R = 0.92$).

По результатам анализа сопряженности даты последнего пожара с величинами спектрального отклика в ближнем инфракрасном диапазоне и монохромном слое и производными значениями — индекса 4 стандартных линейных комбинаций, NDVI, множественной регрессии и третьей компоненты — были рассчитаны растровые слои даты последнего пожара на территорию всего массива сосновых лесов.

Достоверность полиномиальных функций второго порядка для даты последнего пожара и значений ближнего инфракрасного и монохромного каналов оказалась достаточно высокой ($R^2 = 0.84$ и 0.76 соответственно). Территории вырубок по величинам монохромного слоя, том числе и старых, определялись как леса с более ранними датами пожаров, т. е. в целом за счет вырубок на растрах была увеличена доля старовозрастных лесов. Разница наблюдаемых и рассчитанных дат последнего пожара для вырубок достигала 25 лет, в то время как для остальных точек — не более пяти лет. В некоторой степени этот эффект наблюдался и при использовании величин ближнего инфракрасного канала, но отклонения больше относились к свежим вырубкам. Кроме того, расчет по монохромному слою дал изображение с существенной зернистостью, т. е. сильным варьированием значений соседних растров.

Для регрессионного анализа значений индекса 4 линейных комбинаций наилучшие результаты ($R^2 = 0.80$) дало использование полиномиальной функции третьего порядка. Рассчитанный растровый слой дал вполне удовлетворительные результаты. Контурные вырубок, особенно старых, маскировались, а небольшие свежие вырубку определялись как леса с более ранними датами пожаров. Максимальные различия рассчитанного и наблюдаемого возраста последнего пожара составили 17 лет и относились к свежим вырубкам.

Растровый слой, рассчитанный по результатам множественной регрессии, дал зернистое и полосчатое изображение с неясными контурами пожаров, сходное с изображением 8-го компонента. Такой эффект, вероятно, связан с особенностями снимка и взаимной корреляцией его слоев.

Достоверность полиномиальной функции второго порядка связи значений четвертого компонента и даты последнего пожара оказалась очень высокой ($R^2 = 0.95$). На изображении свежие вырубку распознавались как леса с несколько более ранними датами пожаров. Отклонения наблюдаемых и рассчитанных дат пожаров не превышали шести лет. При этом значения первого компонента соответствовали границам вырубок и слабо зависели от давности пожара (рис. 3).

Как показало сравнение вычисленных и наблюдаемых дат последнего пожара, наиболее достоверные результаты дало использование значений четвертого компонента. На основе полученной регрессии по значениям четвертого компонента были определены вероятные даты последних пожаров (рис. 4).

Принимая во внимание, что низовые пожары по площади могут перекрывать пожарами прежних лет, а это перекрытие мы не анализируем, полученные площади следует воспринимать как минимальные площади пожаров соответствующих периодов.

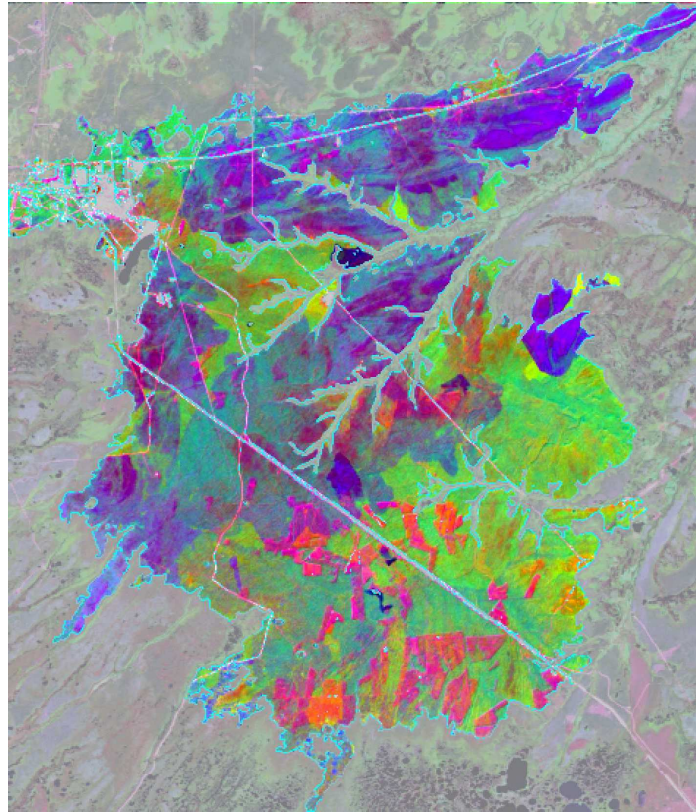


Рис. 3. Расчет с использованием всех каналов (1-, 2-, 4-й компоненты)

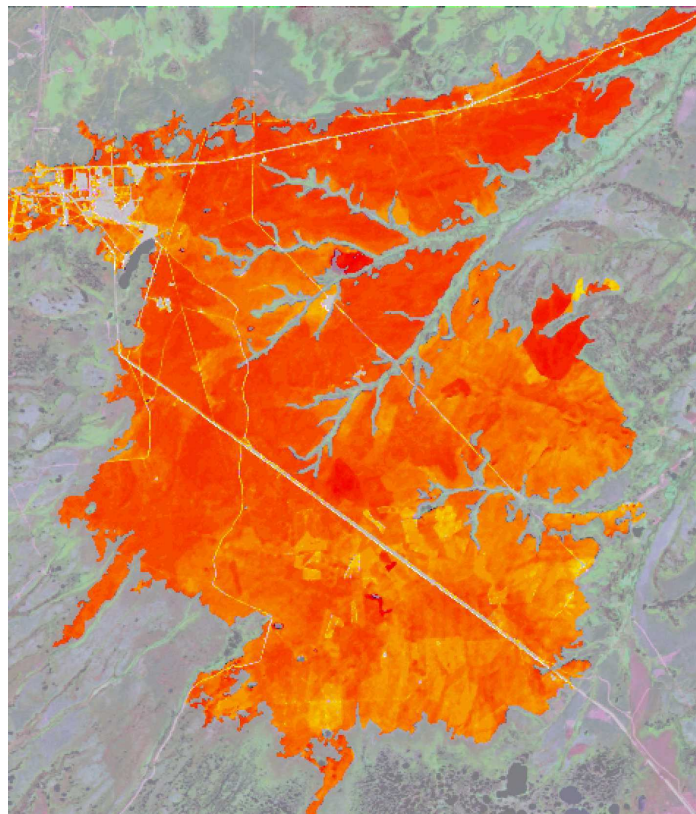


Рис. 4. Вычисленные даты пожаров по значениям четвертого компонента

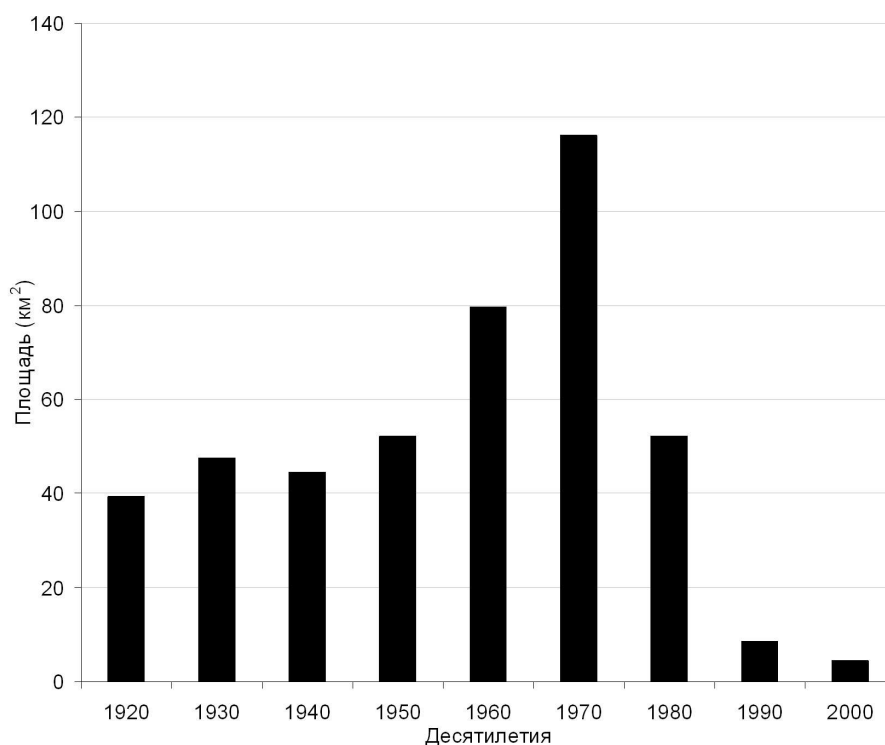


Рис. 5. Площадь пожаров в лесном массиве по десятилетиям, рассчитанная по значениям четвертого компонента

Как видно из распределения площадей (рис. 5), наиболее крупные пожары в лесном массиве произошли в период с 1960 по 1970 г., с началом интенсивного освоения территории, когда выгорело почти четверть массива. Более старые пожарища занимают меньшие площади, но это не значит, что площади пожаров были меньше. Обращает на себя внимание “выровненность” площади пожаров, которые произошли до 1960 г., их площадь колеблется в пределах 9–17% от общей, хотя в действительности, если учитывать вероятные повторные прогорания, может быть несколько больше. Эта доля может соответствовать площади естественного прогорания лесов, частота которой соответствует скорости накопления горючего материала и частоте возникновения пожароопасных погодных условий. Всплеск пожаров в период 1960–1970 гг. можно связать с увеличением источников огня, приведшего к прогоранию большинства участков с достаточным количеством горючего материала.

Начиная с 1970 г. и по настоящее время площадь пожаров стремительно сокращается. Учитывая, что посещаемость лесного массива в это время только возрастала, а вместе с этим увеличивалось и количество возможных возгораний, уменьшение площади пожаров можно объяснить только недостатком горючего материала под пологом леса.

В этой связи антропогенное влияние на пирогенную динамику сосновых лесов северной тайги Западной Сибири можно сформулировать как вероятное увеличение частоты возгораний при сокращении площади пожаров. Сосновые леса при этом в целом оказываются на более ранних стадиях восстановительной динамики, а под пологом леса успевают скапливаться меньше горючего материала.

Выводы

Анализ спутникового изображения с целью ретроспективного анализа пирогенной динамики сосновых лесов позволяет сделать ряд выводов:

— возможна достаточно точная калибровка космического снимка по дате последнего пожара. Наиболее достоверное определение возраста последнего пожара дает использование главных компонентов для массива спектральных характеристик на площади, ограниченной контуром изучаемых лесов;

— согласно вычисленным площадям пожаров за последние 90 лет, естественная доля пожаров составляет 9–17% за десятилетие;

— промышленное освоение района в период 1960–1970 гг. привело к увеличению площади пожаров до четверти от общей площади за десятилетие. К настоящему времени из-за уменьшения запасов горючего материала доля пожаров снизилась до 1–2% за десятилетие.

Список литературы

- [1] Фурьяев В.В. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука, 1996. 251 с.
- [2] Сухинин А.И. Система космического мониторинга лесных пожаров в Красноярском крае // Сиб. эколог. журн. 1996. Т. 3, № 1. С. 85–92.
- [3] ПАНОВА О.В., ЕРШОВ Д.В. Использование данных спектрорадиометра MODIS для регистрации и учета лесных гарей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Матер. Всерос. конф. М.: Полиграф-Сервис, 2005. С. 388–392.
- [4] РОМАСЬКО В.И., КАШКИН В.Б., СУХИНИН А.И. Послепожарная инвентаризация леса по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 1998. № 6. С. 99–103.
- [5] СОЛОВЬЕВ В.С., ВАСИЛЬЕВ Е.К. Спутниковый мониторинг лесных пожаров и оценка их последствий // Наука и образование. 2000. № 4(20). С. 24–27.
- [6] Фурьяев В.В., ЗЛОБИНА Л.П. Методы выявления и оценки потерь углерода в результате многолетней горимости лесов с использованием материалов аэрокосмической фотосъемки // Дистанционные исследования и картографирование структуры и динамики геосистем. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2002. С. 46–48.
- [7] Фурьяев В.В. Использование аэрокосмических снимков для изучения и оценки последствий лесных пожаров // Исследования лесов аэрокосмическими методами. Новосибирск: Наука, 1987. С. 85–98.
- [8] СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В РОССИИ. Итоги. Проблемы. Перспективы: Аналит. обзор / СО РАН. ИОА. ГПНТБ; Ред. В.В. Белов. Новосибирск, 2003. 135 с. (Сер. Экология. Вып. 70).
- [9] ИЛЬИНА И.С., ЛАПШИНА Е.И., ЛАВРЕНКО Н.Н. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. 249 с.
- [10] МАХАТКОВ И.Д., ГНАТ Е.В. Сообщества северотаежных полидоминантных лесов центральной части Сибирских Увалов // Биологические ресурсы и природопользование. 2002. Вып. 5. С. 24–34.

- [11] БАРТАЛЕВ С.А., ЖИРИН В.М., ЕРШОВ Д.В. Сравнительный анализ данных спутниковых систем Космос-1939, SPOT и Landsat-TM при изучении бореальных лесов // Исследование Земли из космоса. 1995. № 1. С. 101–114.

Поступила в редакцию 11 мая 2007 г.